干渉を起こさない2.4GHz帯ワイヤレス通信を実現する

――ノイズ発生のメカニズムとDS-SSスペクトラム拡散方式による干渉の回避

システムの記事

Richard Kapusta

ここでは，最近，ワイヤレスLANやBluetoothなどで広く利用されるようになった2.4GHz帯のワイヤレス通信システムの干渉問題を取り上げる．同じ周波数を利用する無線システムどうしが近くで動作すると，ノイズがのって受信側へうまくデータを転送できなくなる場合がある．本稿では，2.4GHz帯のワイヤレス通信における主な干渉発生源を取り上げ，そのメカニズムを解説する．また，スペクトラム拡散方式の一つであるDS-SS（直接拡散方式）を採用して耐ノイズ性を向上させるシステム設計について紹介する．（編集部）

現在，免許を必要としない2.4GHz周波数帯，いわゆるISMバンド（industry science medical band）で動作するワイヤレス製品がかなり多く出荷されています．身近な製品だけでも，例えばワイヤレスLAN（IEEE 802.11b/g）やBluetoothを搭載したシステム，コードレス電話などが挙げられます．このようなワイヤレス通信を用いる製品の増加に伴い，干渉が問題になってきます．本稿では，2.4GHz帯の干渉のメカニズムと干渉を回避する方法について説明します．

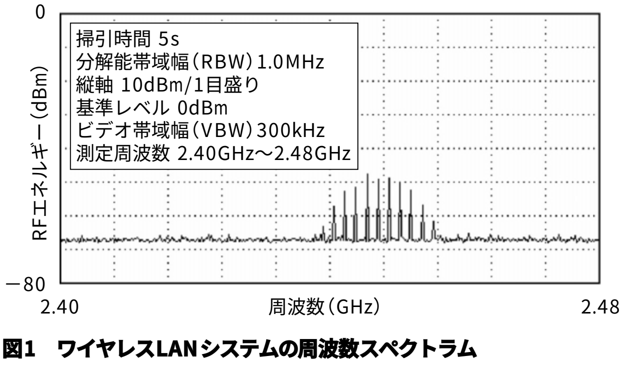


図1　ワイヤレスLANシステムの周波数スペクトラム

送信動作中の一つのワイヤレスLAN（IEEE 802.11b）システムの周波数スペクトラムを示す．IEEE 802.11bは，22MHzの範囲にわたりRF信号を発生する．

1．ワイヤレス通信と干渉発生源の関係

同じ周波数帯を共用するほかの通信技術からの干渉に対する耐性は，エンド・ユーザ側の性能に影響を与えるため，システムを設計するうえで非常に重要な項目です．2.4GHz帯において，干渉に対する堅ろう性とは，IEEE 802.11b/g，Bluetooth，コードレス電話のホスト，および電子レンジと確実に共存できる能力を意味します．

また，セキュリティも課題の一つです．ワイヤレス通信機器の市場が成長することで，利用される場所も家庭からキャンパスやオフィス，商業用設備に広がっていきます．チャネルの可用性，類似した複数のワイヤレス通信機器を確実に共存させるためのインテリジェントなコーディング（暗号）方式がきわめて重要になります．例えば，同じオフィスにいる3人の同僚がワイヤレス・マウスを使って，あなたのファイルを削除し始めたとしたら，これは非常に困ったことになるでしょう．

以下に，2.4GHz帯を使用するワイヤレス通信における，代表的な干渉発生源を挙げます．それぞれの発生源について，RFエネルギー（出力電力）と周波数の関係をスペクトラム・アナライザで測定しました．なお，RFエネルギーは測定する無線装置の出力と，無線装置からアナライザまでの距離に依存します．以下に示すスペクトラム・アナライザの波形は，すべてほぼ同じ距離で測定を行った場合のものです．そのため，信号の大きさは，このバンドで動作しているさまざまな無線システムの間の相対的な強度を示

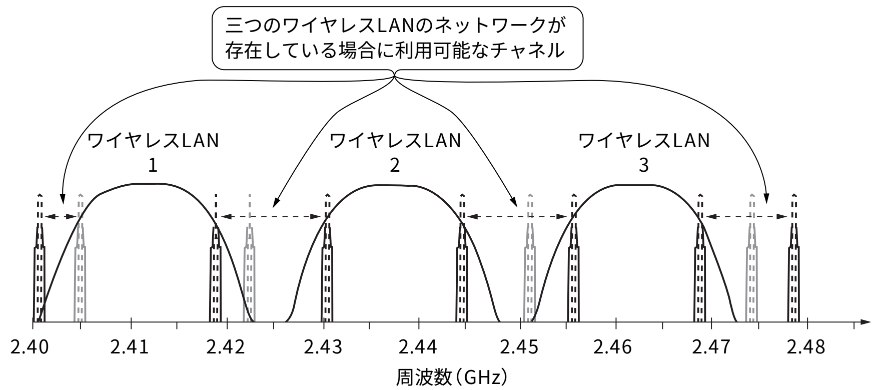
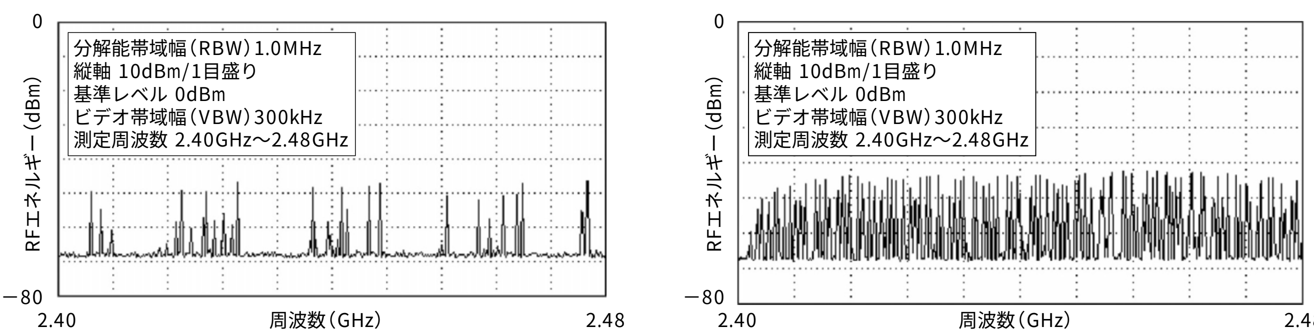


図2
三つのワイヤレスLANが共存する場合
ワイヤレスLANでは，2.4GHz帯のさまざまな場所を専有することができるうえ，三つまでのネットワークが互いに重なり合わずに共存できる．三つのワイヤレスLANのネットワークが同じ物理的空間に存在する場合，利用可能な83MHzのうち66MHz（22MHz×3）を使用することがある．



（**a**）掃引時間500ms　（**b**）掃引時間5s

図3　Bluetoothシステムの周波数スペクトラム
（a）は，ホストと通信中のBluetoothデバイスを示している．掃引時間は500ms．Bluetoothは，任意のある時点において1MHzのRFチャネルを使用し，毎秒1,600回ずつチャネル間をホッピングする．（b）の波形は，（a）と同じBluetoothデバイスのものである．掃引時間は5sであり，Bluetoothが2.4GHz帯のバンド内ですべてのチャネルを使用していることがわかる．つまり，Bluetoothの場合，バンド内で動作している2.4GHz帯を使用するどのデバイスに対しても信号が衝突し，再送信を行わせる原因になる可能性が高い．

していることになります．

● 最大66MHzを占有するワイヤレスLAN

2.4GHz帯で動作する代表的なシステムとしてワイヤレスLAN（Wi-Fi）が挙げられます．現在，ワイヤレスLANシステムには多くの種類があります．そのうち，IEEE 802.11bとIEEE 802.11gは2.4GHz帯を利用します．この二つのシステムは出力するエネルギーの量が類似しており，またバンド内で専有する帯域幅も約22MHzと似ています．**図1**に，2.4GHz帯で動作している一つのワイヤレスLANシステム（送信時）の周波数スペクトラムを示します．

ワイヤレスLANの送信機がほかの2.4GHzシステムの受信機の近くにあり，それらがバンド内の同一または近い周波数で動作している場合，ワイヤレスLANが大きな干渉の原因になることがあります．もっとも極端な（しかし，一般的なケースになりつつある）例としては，独立した三つのワイヤレスLANのネットワークが同じ物理的空間に設置された場合が考えられます（ワイヤレスLANでは，最大三つの異なるネットワークを重なり合わずに共存させることができる）．このとき，利用可能な83MHzのバンド幅のうち，66MHzをワイヤレスLANのために使用することがあります（**図2**）．これらの周波数を避けて通信を行うことは，どのRFシステム設計者にとっても難しい課題です．

● 周波数ホッピングで信号の衝突を避けるBluetooth

別の干渉発生源としてBluetoothシステムが挙げられます．Bluetoothは，スペクトラム拡散方式としてFH-SS（frequency hopping spectrum spread；周波数ホッピング方式）を採用しています．これは，Bluetoothシステムとそれに関連するすべてのノードが625μsごとに，2.4GHz帯で利用可能な83MHz内の79チャネルの一つに周波数を変化させるということです．

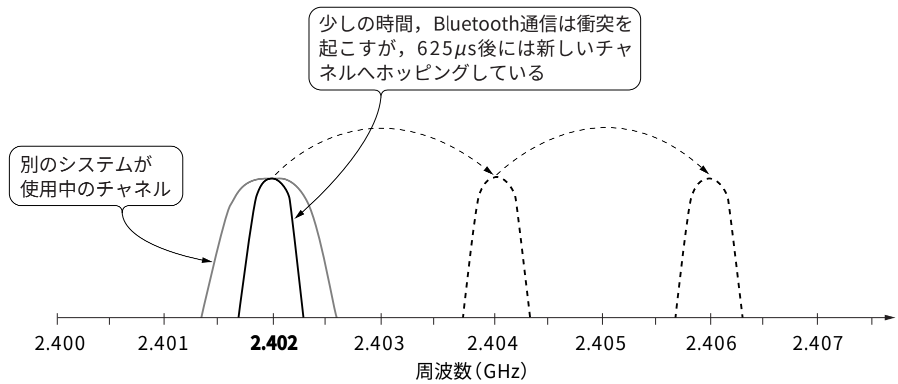


図4
周波数ホッピング
あるRFシステムが周波数ホッピングを採用していなければ，Bluetoothシステムがそのシステムの周波数と重なるのは79回のホッピングのうち1回だけで，その後，すぐに別の周波数にホッピングしていく．

図3（a）は，500ms間のBluetoothシステムの動作を示します．一方，**図3（b）**は同じBluetoothシステムについて，5s間にわたる動作を示しています．周波数ホッピングの理論では，2.4GHz帯を使用する別のシステムが存在する場合，あるシステムがそれらのシステムと衝突するのは数パーセントの時間だけで，残りの時間は「静かな（使用されていない）」チャネルを見つけて動作を続けます．別のシステムが周波数ホッピングを採用していなければ，Bluetoothシステムがその別のシステムの周波数と重なるのは79回のホッピングに1回だけで，その後，すぐに別の周波数にホッピングしていきます（**図4**）．つまり，このような場合，ほとんどの時間はBluetoothシステムが別のRFシステムに影響を与えることはないといえます．

Bluetoothあるいはほかの周波数ホッピングを採用したシステムにとって，最大の問題は2.4GHz帯でトラフィックが混雑（通信量が増大）したときに発生します．例えば，三つのワイヤレスLANのネットワークが同時に動作している場合，残された「静かな」チャネルの数は「ノイズの多い（使用されている）」チャネルの数に比べてかなり少なくなります．その結果，周波数ホッピングを採用しているシステムは，ほかのシステムとの競合のため，ほとんどの時間とエネルギーをホッピングとデータの再送信に費やすことになります．

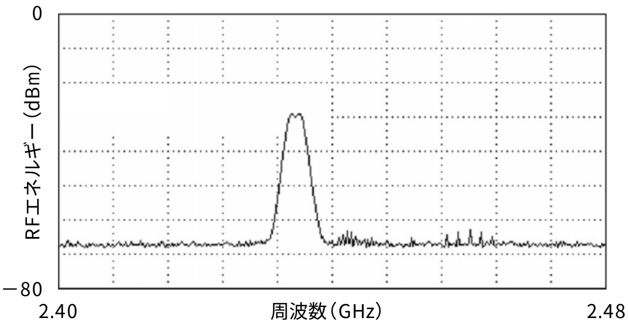
この問題を解決する一つの方法として，適応型周波数ホッピングと呼ばれるものがあります．この方法では，どのチャネルがエラーを起こすかをシステムに記憶させ，その後のホッピングではそれらのチャネルを避けるようにします．このとき，本来のBluetooth規格の79チャネルより少ない範囲でホッピングすることになります．これは，BluetoothとワイヤレスLANの間の干渉の問題を緩和することにはいくらか役立ちますが，複数のBluetoothネットワークを同じ物理的空間に置く場合にはあまり効果的な方法とはいえません．それぞれのBluetoothは，より少ないチャネル間をホッピングするため，さらに頻繁に衝突し合うことになるからです．一般に，周波数ホッピングを採用すると，ネットワークが複雑になり，コストがかなり増加します．また，ネットワーク全体の同期によって，総消費電力に影響を与えます．

● コードレス電話が他システムに大きく影響

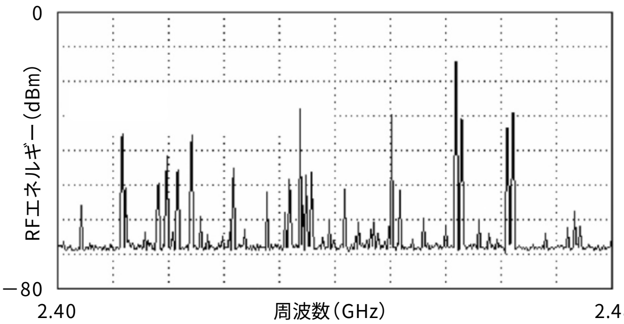
2.4GHz帯のワイヤレス通信において3番目の大きな干渉発生源は，家庭用のコードレス電話です．こうした電話の中には，スペクトラム拡散方式としてDS-SS（direct sequence spectrum spread；直接拡散方式），あるいは上述のFH-SSを採用しているものがあります．すべてのコードレス電話は，2.4GHz帯において大きなエネルギーを出力しており，別のRFシステムに対してノイズを発生する（つまり，「静かさ」を破壊する）可能性があります．

図5（a）は，あるDS-SSコードレス電話の周波数スペクトラムを示したものです．この電話機が空中に出力するRFエネルギーの量を表す曲線の高さに注目してください．**図5（b）**と**図5（c）**は，それぞれ500ms，10sの間に捕らえたFH-SSコードレス電話の周波数スペクトラムです．ここでも，これらの電話機からどれだけ多くのRFエネルギーが空中に出力されているかがわかります．

さらに，電話機ごとにRFのスペクトラム特性が大きく異なっています．あるものは2.4GHz帯の一部分だけを使用し，別のものはバンド全体を使用します．これらの電話機がどのように動作し，ほかのRFシステムにどう影響するのかを予測することは非常に困難です．

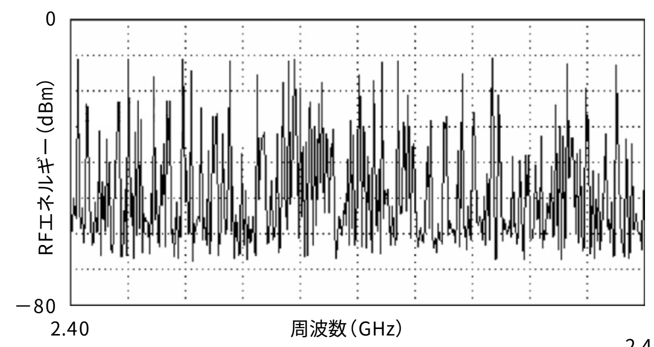


(**a**) DS-SS(掃引時間5s)



(**b**) FH-SS(掃引時間500ms)

((**a**)〜(**c**)共通)
分解能帯域幅(RBW)1.0MHz
縦軸 10dBm/1目盛り
基準レベル 0dBm
ビデオ帯域幅(VBW)300kHz
測定周波数 2.40GHz〜2.48GHz



(**c**) FH-SS(掃引時間10s)

図5　コードレス電話の周波数スペクトラム

(a)は，スペクトラム拡散方式としてDS-SSを採用して動作している1台の(ホッピングしない)コードレス電話の周波数スペクトラムを示している．ピークの高さと使用帯域に注目してほしい．この種の電話は，同じタイミングで同じ周波数を使おうとするデバイスにとって大きな干渉の原因になる．この干渉を受けないようにする最善の手法は，単純にその存在を認識し，これを完全に回避することである．(b)は，FH-SSを採用したコードレス電話の周波数スペクトラムを示したもので，基地局ユニットとの通信に周波数ホッピングを使用している．このRF信号はBluetoothと非常によく似ているが，信号強度が一般にBluetoothよりも高い．周波数ホッピング方式の電話は，2.4GHz帯を使用するほかのシステムと衝突するが，データを効率的に受信側に届けるためにはデータの再送信で十分のはずである．(c)は，(b)と同じコードレス電話機を用いて，掃引時間を10sにしたもの．RF信号の出力が時間とともに変化している．これは，出力が一定しているBluetoothとは異なる特徴である．

● 予測不可能で突発的なノイズを発生する電子レンジ

最後の，そして，おそらくいちばん多く見られる2.4GHz帯の干渉発生源は電子レンジです．電子レンジは，もっとも予測不可能かつ突発的なRFエネルギー源です．それぞれの電子レンジは，異なる量のエネルギーをバンド全体にわたって異なる形で拡散します．また，電子レンジごとにシールドのしかたも異なります．**図6**は，動作中の電子レンジが2.4GHz帯で発生するRFエネルギーの例を示しています．

2. DS-SSを用いて干渉への耐性を上げる

2.4GHz帯を利用するすべての無線システムは，システムどうしが近くにあるため，同じ周波数を使用すると，干渉を引き起こしやすくなっています．RF信号をより確実に伝送するための手法として，データを多数回再送信する，送信機の出力を増大させる，送信機と受信機の間の距離に制限を設ける，といったものが挙げられます．しかし，こうした干渉回避手段を施すよりも，実はDS-SSを使うほうが効果的です．

このDS-SSを採用したワイヤレス通信技術として，筆者ら(米国Cypress Semiconductor社)の「WirelessUSB」があります(**図7**)．このWirelessUSBは，USBデバイスを2.4GHz帯の周波数を利用して，ワイヤレスで接続するものです．例えば，マウスやキーボードなどのパソコン周辺機器やゲーム・パッド，リモコンといった民生機器向けのヒュ

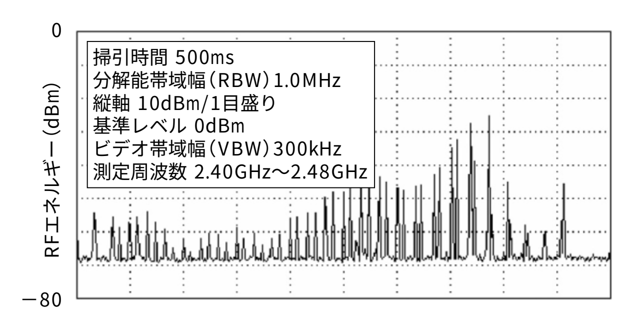


図6　電子レンジの周波数スペクトラム

電子レンジから発生する突発的なエネルギーを示す．電子レンジごとに，発生するエネルギーや備えているシールドなどが異なる．この種の干渉は一般にランダム・ノイズに似ており，突発的であるため，ほとんどのDS-SSまたはFH-SSを採用した通信システムは，この干渉に耐えることができる．

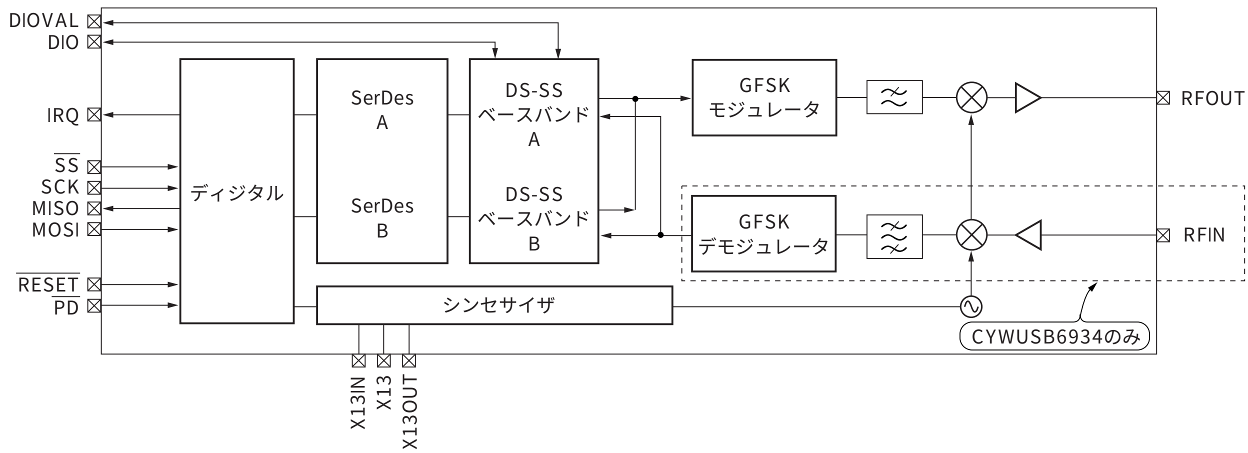


図7　WirelessUSB対応チップの内部ブロック図

Cypress Semiconductor社のUSBによって接続できる2.4GHz帯の無線通信用LSI「WirelessUSB LS」の内部ブロック図を示す．CYWUSB6932は送信専用LSI，CYWUSB6934は送受信可能なトランシーバLSI．

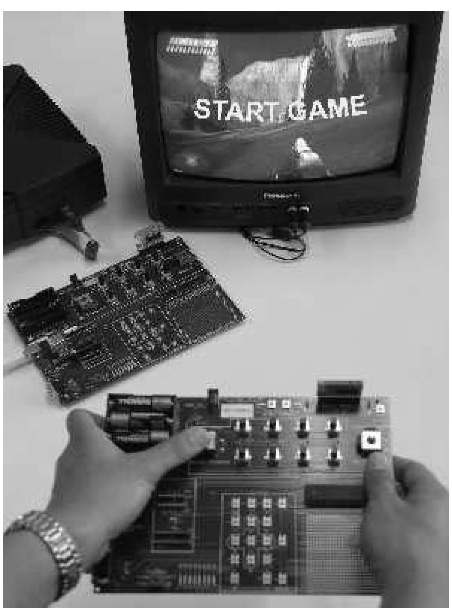


写真1　WirelessUSBをゲーム・パッドとして利用

ーマン・インターフェース・デバイス（HID）の設計に利用できます（**写真1**）．

DS-SSの基本的な前提は，各データ・ビットを‘1’と‘0’の列（チップと呼ぶ）にエンコードし，その列を無線で送信することです．このような無線システムは，この手法を用いないシステムよりも本質的に干渉への高い耐性を持っています．

各データ・ビットは，PN（pseudo noise）コードによって表されます．干渉が発生した状況（または到達距離の限界付近）では，しばしばいくつかのPNコード・チップが破損した状態で受信されます． DS-SS受信機は，データ相関器を用いて受信したデータ・ストリームをデコードします．チップ・エラーの数が相関器のエラー限界値よりも少ない場合，データは正常に受信されます（**図8**）．

一方，相関器の限界値を超えた場合，受信データ・ビットは破損した形で受け取られるのではなく，「消去」されます．データの消去はエラーの発生よりもずっと訂正が容易だからです．なお，データが消去される確率に比べてデータが破損する確率は無視できるほど小さくなります．なぜなら，大半のチップを破損するほどの干渉が起こらないかぎり，データの破損にはつながらないからです．

また，データ・バイトごとに排他的論理和（EXOR）をとり，得られたチェック・サムを各パケットの最後のバイトとして送信することで，受信パケット内のビットごとに1個のエラーを訂正できます．例えば，WirelessUSBシステムでは，10%を超えるチップ・エラーを起こしている周波数においても，エラーなしに良好にデータを受信できます．WirelessUSBシステムは干渉への耐性が高く，多くの場合，屋内では50m以上の通信距離を確保します．

● 堅ろう性とデータ・レートのトレードオフ

当然，こうしたハードウェアによる手法にはトレードオフがあります．そのトレードオフとはデータ・レートです．1Mbpsのシンボル・レートを用いて1ビット当たり64チップのデータを送信する無線装置では，最大データ・レート

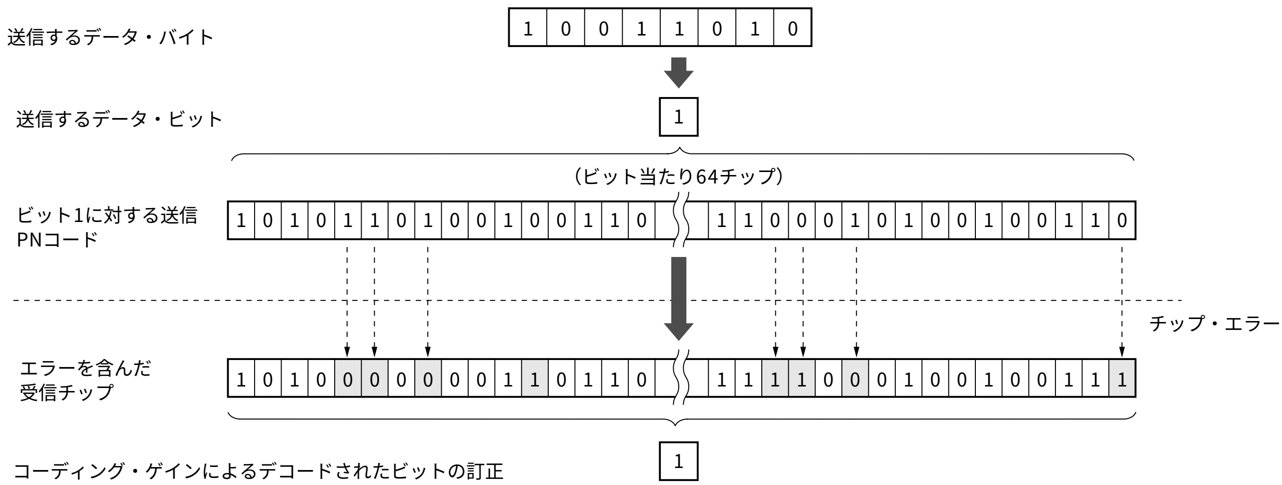


図8　DS-SS採用システムにおけるチップ・エラー訂正

は約16kbps（＝1Mbps÷64）になります．システムによっては，高い堅ろう性（チップ数が多い）が要求される場合もありますが，高速なデータ・レート（チップ数が少ない）が望ましい場合もあります．そのため，ビット当たりのチップ数を設定できる無線システムでは，利用できるデータ・レートを考慮して設計することが重要です．

DS-SS以外の手法で高いデータ・レートの達成をうたっているものもありますが，そうした手法の中にはデータ・パケットを頻繁に再送信することで最大データ・レートに影響を与えているものもあります．また，DS-SSを用いないシステムは，多くの場合，前方エラー訂正（FEC：forward error correction）注を利用してビット・エラーを起こしにくくしています．この方法では，重複データやチェック・ビットといった冗長データを組み込んで送信するため，実際のデータのスループットが最大66％低減することもあります．

● 空きチャネルを自動的に見つけるプロトコル

ここまでで，2.4GHz帯のワイヤレス通信システムにDS-SSを使用することで，ある一定レベルの堅ろう性を確保できることを説明しました．しかし，2.4GHzの周波数帯は非常に幅広く使用されているため，干渉が大きすぎて，上に述べたエラー訂正機能だけでは訂正しきれない場合があります．こうした場合，例えばWirelessUSBでは，プロトコルによって送信機と受信機が自動的に空いたチャネルに移動することによって干渉を回避するようにしています．

この「静かな」チャネルを自動的に見つけるという方法では，ワイヤレス通信システムが常時，信号強度やパケット・エラー，再送信要求を監視します．ある一定のエラー限界値に達すると，システムはホストとその関連ノードのすべてをより静かな新しいチャネルに移行させる「周波数変更ルーチン」を実行します．そして，新しいチャネルに移ると，そのシステムは新たな干渉の発生源が現れるまでその周波数で動作を続けます．

パケット・エラーと再送信の監視に加えて，強い干渉信号が存在するときを特定することも不可欠です．強い干渉信号が発生すると，無線システムの受信機ではデータ・パケットの受信が不可能になります．こうした状況では，かならず新しいチャネルへ移動しなければなりません（**図9**）．2.4GHz帯の静かなチャネルを効果的に見つけるために，受信信号強度表示信号（RSSI：received signal strength indicator）と呼ばれる機能があります．RSSIは無線装置からのアナログ入力であり，この無線装置はある周波数チャネルの中に存在するRFエネルギーの量を測定するためのものです．あるチャネルのRSSIレベルを知ることは，そのチャネルが「静かな」ものであるかどうかを判断する際に必要になります．

WirelessUSBの無線機にはこの機能が組み込まれています．RSSIレベルはそのほかの情報とともに，干渉を回避するために別のチャネルに移動するべきかどうか，またいつ

注：送信側でエラー制御用のデータを送信データに入れておき，受信側でエラーの訂正や検出を行う方法．



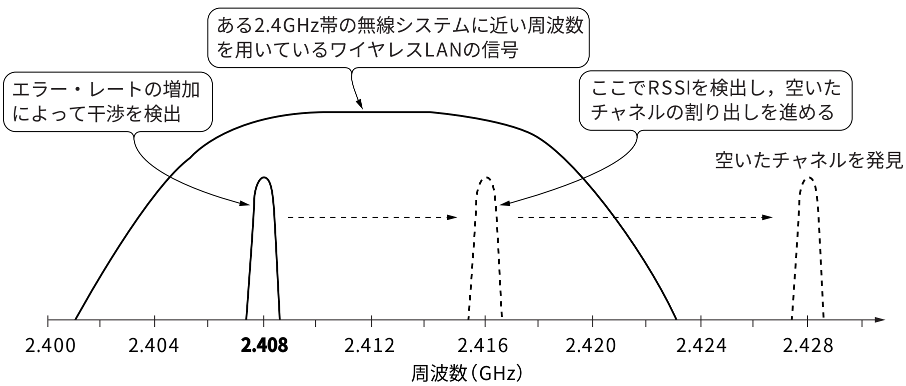


図9
強い干渉が発生した場合の対処方法
強い干渉を検知すると，無線システムは自動的に新しい利用可能なチャネルに移動する．RSSI（受信信号強度表示信号）のレベルを見ることで，そのチャネルが空いているかどうかがわかる．

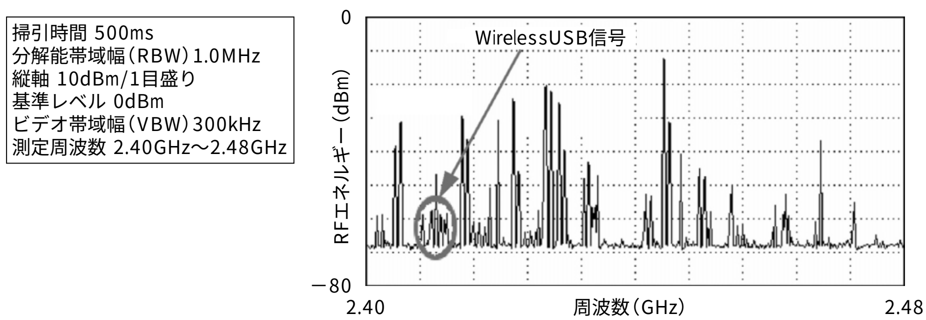


図10　干渉のもとで動作するWirelessUSBシステム
単一の1MHzチャネルを専有するWirelessUSBの信号が，FH-SSコードレス電話と共存してうまく動作するようすを示す．この場合，コードレス電話機がWirelessUSB信号と干渉するたびに，WirelessUSBがチャネルを切り換えたりはしていない．周波数ホッピングの信号が新しいチャネルにホッピングするまで待ち，その後，必要があればデータ・パケットを再送信する．WirelessUSBシステムが動作しているところへFH-SS以外の新たな干渉システムが入ってきた場合，WirelessUSBシステムは2.4GHz帯の新たな「静かな」チャネルに移動して干渉を回避する．

移動するべきかを決定する際に利用されます．

FH-SSシステムが瞬間的に使用中のチャネルにホッピングしてきたときは，システムがチャネルを変更することがないように，受信機の感度のしきい値をつねに適切に設定しなければなりません．このバランスが，堅ろうでしかも応答性の良い無線システムにとって重要です．WirelessUSBでは，プロトコルによってFH-SSシステムに過剰反応することなく，強力な干渉発生源を回避するようにしています．

図10は，FH-SSコードレス電話のそばで動作しているWirelessUSBシステムの周波数スペクトラムです．この場合，WirelessUSBシステムはコードレス電話からの干渉を受けずに，10mを超える距離で確実にデータを送信することができます．

無線技術は，パソコンとその周辺機器の市場へ浸透しつつあります．2007年までに出荷されるパソコンと周辺機器の接続の1/4は無線になると予測されています．干渉やセキュリティといった課題に少し注意を払えば，実際に売れる無線製品の開発を順調に進めることができるでしょう．

Richard Kapusta

Director of Marketing and Applications
米国Cypress Semiconductor社

<筆者プロフィール>
Richard Kapusta．1992年にProgrammable Logic Groupのアプリケーション・エンジニアとして同社に入社．その後，CPLD製品のSoftware Application Manager，Product Marketing Managerを務めた．米国University of Illinoiのコンピュータ・エンジニアリングを専攻し，学士号を取得している．